

Комбинированный способ определения места повреждения в линии электропередачи переменного тока

ИВАНОВА Е.А.

Рассмотрены недостатки существующих методов определения места повреждения (ОМП) — импедансного и волнового — в высоковольтных линиях (ВЛ) электропередачи переменного тока. Рассмотрена возможность применения известного спектрального метода ОМП в линиях постоянного тока для ВЛ переменного тока. Описаны причины появления погрешностей спектрального метода ОМП в ВЛ переменного тока и рассмотрены возможные способы борьбы с ними. Приведена оценка влияния переходного сопротивления в месте КЗ на расчет расстояния до места повреждения спектральным методом для ВЛ разных классов напряжения (110, 220 и 330 кВ). Предложен новый комбинированный способ ОМП, основанный на совместном использовании импедансного и спектрального методов ОМП в ВЛ переменного тока. Точность предлагаемого метода по предварительным расчетам не превышает 0,5% длины ВЛ.

Ключевые слова: линия электропередачи переменного тока, определение места повреждения, переходное сопротивление, импедансный метод, волновой метод, спектральный метод

Электрическая энергия является базисом в обеспечении жизнедеятельности современного общества. Надежная работа энергосистемы — необходимое условие для обеспечения экономического развития любого государства. Воздушные линии (ВЛ) электропередачи являются наиболее повреждаемыми элементами электрических сетей и требуют привлечения значительных ресурсов на поиск мест повреждений и проведения ремонтно-восстановительных работ.

По данным прошлых многолетних наблюдений на 1000 км электрических линий в год происходило в среднем на ВЛ 110 кВ — 11 повреждений, на ВЛ 220 кВ — 6 повреждений, на ВЛ 330 кВ — 5 повреждений и на ВЛ 500–750 кВ — 4 повреждения [1].

Как показывает статистика, причинами повреждений ВЛ могут стать:

перекрытия изоляторов из-за загрязнения их поверхности атмосферными химическими осадками («выбросами» промышленных предприятий);

обрывы и схлестывания проводов при ветре и сбросе гололёда;

перекрытия при коммутационных и грозовых перенапряжениях;

перекрытия на растущие или падающие деревья; пожары;

монтажные работы вблизи трасс и др.

Наиболее частым и тяжёлым видом повреждения ВЛ являются короткие замыкания (КЗ). Согласно статистическим данным наиболее частыми являются однофазные КЗ на землю. Для ВЛ 110 кВ их вероятность достигает 85%.

Аварийный вывод ВЛ из работы приводит к ущербу, связанным с недоотпуском электриче-

ской энергии потребителям. Для сокращения времени ликвидации повреждений на ВЛ в настоящее время используют всевозможные методы и средства определения места повреждения (ОМП).

Однако широко применяемые в настоящее время методы и средства ОМП за счет погрешностей чаще могут указать только возможную зону обхода поврежденной линии электропередачи.

Основной вклад в принципиальные погрешности, которыми обладают существующие методы и устройства определения места повреждения ВЛ, вносят неизвестное переходное сопротивление в месте КЗ, погрешности измерения токов и напряжений [2].

Обработка статистических данных о повреждениях на ВЛ [2] дала следующие результаты:

1) если задавать зону обхода $\pm 2\%$ длины ВЛ, то только в 19% случаев повреждение окажется в зоне;

если зона $\pm 5\%$, то попадание составит 44,5%;

при зоне $\pm 10\%$ — 76,2%;

при зоне $\pm 15\%$ — 92,3%.

Таким образом, точное определение расстояния до места повреждения на ВЛ остается важной оперативной задачей энергосистем. Все известные методы ОМП имеют погрешность, которая в зависимости от конкретных условий может достигать больших значений.

В статье рассмотрены особенности существующих методов ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР), предложен спектральный метод повышения точности определения по ПАР, позволяющий снизить погрешности наиболее распространенных методов ОМП. Спектральный метод

ОМП предлагается к разработке для интеграции его в существующие устройства ОМП с целью повышения их точности.

Импедансный метод ОМП в ВЛ переменного тока. Этот метод основан на анализе напряжений и токов трехфазной линии, измеренных, как правило, с одного конца ВЛ (односторонний метод ОМП по ПАР). Расстояние до места замыкания определяется сопротивлением короткозамкнутого участка ВЛ, полученным как частное деления составляющей основной частоты аварийного напряжения на конце ВЛ на составляющую основной частоты аварийного тока на том же конце ВЛ.

На точность результата определения места повреждения в линии, кроме того, оказывают неблагоприятное влияние:

некоторая неопределённость линейных параметров, в особенности сопротивления нулевой последовательности, которое зависит от сопротивления земли под линией (неодинакового вдоль трассы и изменяющегося с погодой); так, в [3] констатируется, что при 20%-й погрешности в определении Z_0 линии может образоваться 15%-я погрешность в вычисленном результате определения места повреждения;

недостаточная точность модели линии, принятой в расчёте (например неучёт отсутствия транспозиции);

наличие шунтовых реакторов или конденсаторных батарей;

небаланс нагрузок;

ошибки измерений (ТН, ТТ, АЦП);

погрешности в системе фильтрации входных сигналов.

Для двухконцевой однородной ВЛ в [3] предложен алгоритм, использующий микропроцессорную технику на каждом конце для записи трехфазных напряжений и токов с кодированием сигналов и передачей данных на другой конец линии с помощью Internet технологий.

Импедансный метод ОМП нашел свое применение в наиболее массово выпускаемом устройстве ОМП ИМФ-3С для ВЛ переменного тока классов 110–750 кВ длиной до 400 км, созданном НПФ –

Радиус (Москва) совместно с АО «Фирма ОРГ-РЭС» [3]. Импедансный метод ОМП, применяемый в ИМФ-3С, базируется на одностороннем измерении аварийных токов и напряжений основной частоты. На рис. 1 приведена первичная схема участка сети ВЛ, на которой условно обозначены средства измерения параметров аварийного процесса (трансформаторы тока ТТ1, ТТ2 и напряжения ТН1, ТН2), устройства РЗА с АПВ, выключатели шинные $Q_{ш1}$, $Q_{ш2}$ и линейные $Q_{вл1}$, $Q_{вл2}$ шины подстанций.

На ВЛ значительный процент составляют неустойчивые повреждения, которые самоликвидируются после снятия напряжения с ВЛ. Поэтому кроме средств релейной защиты на ВЛ, как правило, устанавливаются устройства автоматического повторного включения (АПВ), которые обеспечивают быстрое включение ВЛ и в большинстве случаев предотвращают обесточивание потребителей или устойчивый разрыв электропередачи.

При возникновении КЗ (как правило, через переходное сопротивление $R_{п}$) информация об изменении токов и напряжений относительно уставки подается в блок устройства релейной защиты РЗА₁ и РЗА₂, после чего системой релейной защиты формируется сигнал на отключение линейных выключателей и АПВ.

Погрешности импедансного метода ОМП. Как отмечено в [2], при решении задачи одностороннего ОМП (т.е. определении расстояния l_x до места КЗ по фиксированным токам и напряжениям с одного конца ВЛ) неизбежно возникает ошибка из-за неизвестного значения переходного сопротивления $R_{п}$ в месте КЗ, а также неизвестного тока КЗ противоположной подстанции (ПС). При этом переходным сопротивлением может оказаться не только наиболее вероятное сопротивление заземления опоры ВЛ (случай перекрытия на опору), но и сопротивление цепи тока КЗ при перекрытии на деревья вдоль трассы ВЛ. Если значение сопротивления заземления опоры ВЛ, как известно, нормируется ПУЭ (в пределах 10–30 Ом), то сопротивление дерева – величина неопределенная и ее значение может в принципе оказаться выше предельных.

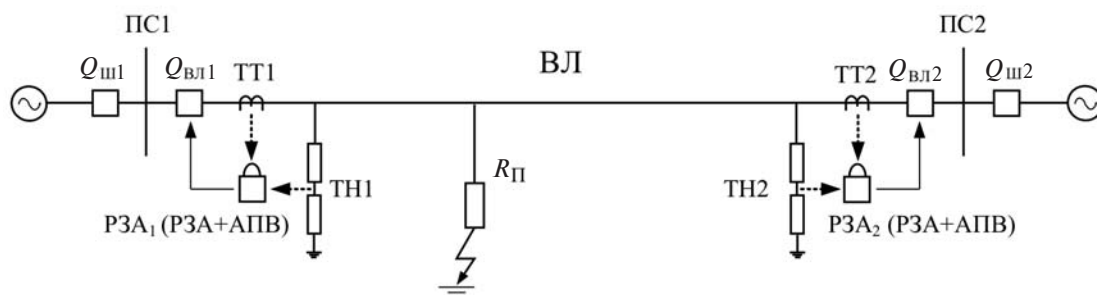


Рис. 1. Первичная схема участка сети ВЛ

Для распространенных в сетях России устройств ОМП [3] средняя относительная погрешность определения расстояния до места повреждения односторонним методом оценивается в 5% при значении тока не менее номинального и угле между током и напряжением (j) от 45 до 90°. Таким образом, метод ОМП на основе одностороннего замера обладает следующими недостатками.

1. Сравнительно низкая точность (5%). Для ВЛ длиной, например, 400 км погрешность в ОМП может составить 20 км.

2. Зависимость точности от фазового сдвига j между током и напряжением. При уменьшении угла, которое происходит с ростом R_{Π} , погрешность возрастает и при угле $<45^\circ$ может превысить 5%.

Одним из целесообразных подходов в решении задачи нахождения места повреждения на линии электропередачи и повышения точности определения расстояния до места повреждения на сегодняшний день в соответствии с действующей инструкцией [4], а также на основе методических указаний [5] является применение комплексного подхода, основанного на анализе параметров аварийного режима, применении многостадийных расчетов и использовании односторонних и двусторонних импедансных методов.

Спектральный метод ОМП в ВЛ переменного тока. В качестве одного из способов повышения достоверности определения места повреждения предлагается рассмотреть уточнение результатов, полученных известным импедансным методом. Данный подход, во-первых, не требует дополнительных значительных вложений в аппаратную часть системы и, во-вторых, соответствует инструкции [4].

Для уточнения методов ОМП по ПАР, применяемых в качестве основных для ОМП ВЛ 110 кВ и выше, предлагается использовать спектральный метод ОМП, алгоритм которого изложен ниже.

Известен способ ОМП [6], основанный на спектральном методе и позволяющий определять расстояния до места замыкания в ВЛ постоянного тока.

При возникновении КЗ в линии постоянного тока напряжение поврежденного полюса резко снижается и линия начинает разряжаться через место КЗ. Спектральный анализ процесса разряда позволяет выделить резонансную частоту короткозамкнутого контура, соответствующую нулевой проводимости контура. Зная «погонные» значения индуктивности и емкости ВЛ и значение резонансной частоты короткозамкнутого контура, представляется возможным вычислить длину короткозамкнутого участка.

Спектральный метод ОМП предполагает использование информации об аварийных составляющих процесса, полученных с измерительных трансформаторов, установленных по концам линии постоянного тока, не требует применения дополнительного оборудования и позволяет определить расстояние до места повреждения с высокой точностью.

Представляется возможным использовать данный метод и для линии переменного тока. Схема замещения короткозамкнутого участка линии электропередачи представлена на рис. 2.

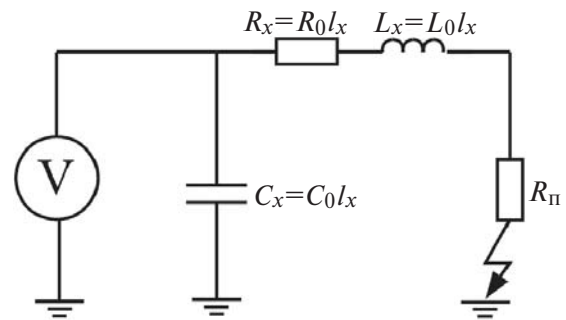


Рис. 2. Схема замещения короткозамкнутого участка линии электропередачи

Решая уравнения, составленные для процесса разряда в схеме по рис. 2 (в предположении, что линия однородная), с помощью операторного метода для резонансной частоты, соответствующей нулевой проводимости контура, получаем выражение для определения длины короткозамкнутого участка:

$$l_x = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \text{ (км)}, \tag{1}$$

где A – комплексный коэффициент:

$$A = \frac{\partial^2}{\partial p^2} p^2 L_0 C_0 + \frac{2}{p} p C_0 R_0 \frac{\partial}{\partial t} B - \text{ комплексный ко-}$$

эффициент: $B = \frac{\partial^2}{\partial p} p C_0 R_{\Pi} \frac{\partial}{\partial t} C = 1; p - \text{ оператор:}$

$p = -a_0 + j2pf_0; f_0 - \text{ частота, соответствующая колебательному процессу разряда линии через место повреждения, выделенная из спектральной характеристики кривой напряжения поврежденной фазы линии; } a_0 - \text{ затухание колебательного процесса разряда линии; } L_0, C_0, R_0 - \text{ «погонные» параметры линии на частоте } f_0; R_{\Pi} - \text{ переходное сопротивление в месте КЗ.}$

Для успешного решения задачи определения расстояния до места замыкания все «погонные» параметры ВЛ должны быть заранее известны – измерены или рассчитаны в соответствии с геометрией проводов на опоре.

На рис. 3 приведена кривая аварийного напряжения поврежденной фазы при однофазном КЗ

линии электропередачи, а также временная диаграмма действия РЗ и АПВ в этом случае. В кривой аварийного напряжения можно выделить три характерных интервала. Первый интервал (до момента времени $t_1 = 0,1$ с) существует в рабочих режимах ВЛ. Второй интервал – аварийный режим в ВЛ – начинается сразу после возникновения КЗ в момент времени $t_1 = 0,1$ с и характеризуется снижением амплитуды напряжения в поврежденной фазе. Через 15 мс после возникновения аварийного процесса в момент времени $t_2 = 0,115$ с происходит пуск средств релейной защиты, которая вступает в действие в момент времени $t_3 = 0,165$ с по истечении задержки на срабатывание (50 мс). Третий интервал на кривой аварийного напряжения начинается в момент $t_4 = 0,215$ с и характеризуется разрядом отключенной линии через переходное сопротивление в месте КЗ. С этого же момента обновляется запись данных в кольцевой буфер памяти, необходимых для реализации спектрального метода. Интервал времени $\Delta t = t_4 - t_3 = 0,215 - 0,165 = 0,05$ с включает в себя суммарное собственное время действия промежуточных реле в схеме управления вы-

ключателем и собственное время отключения выключателей. Запись данных об аварийном процессе с момента $t_4 = 0,215$ с происходит в течение 3–4 периодов промышленной частоты, после чего в контроллере устройства ОМП происходит обработка записанных данных и расчет расстояния до места КЗ.

Для получения основной частоты, соответствующей колебательному процессу разряда линии через место повреждения, необходимо выполнить преобразование Фурье исходного сигнала – информативной части кривой напряжения поврежденной фазы линии, зафиксированной в течение 3–4 периодов промышленной частоты с момента отключения линейных выключателей, и найти максимум полученного частотного спектра. Точное определение максимума спектральной характеристики аварийного напряжения позволит максимально достоверно рассчитать расстояние до места замыкания на ВЛ. Однако спектральный метод ОМП, как и другие методы и способы определения места замыкания, не свободен от погрешностей, обусловленных различными факторами.

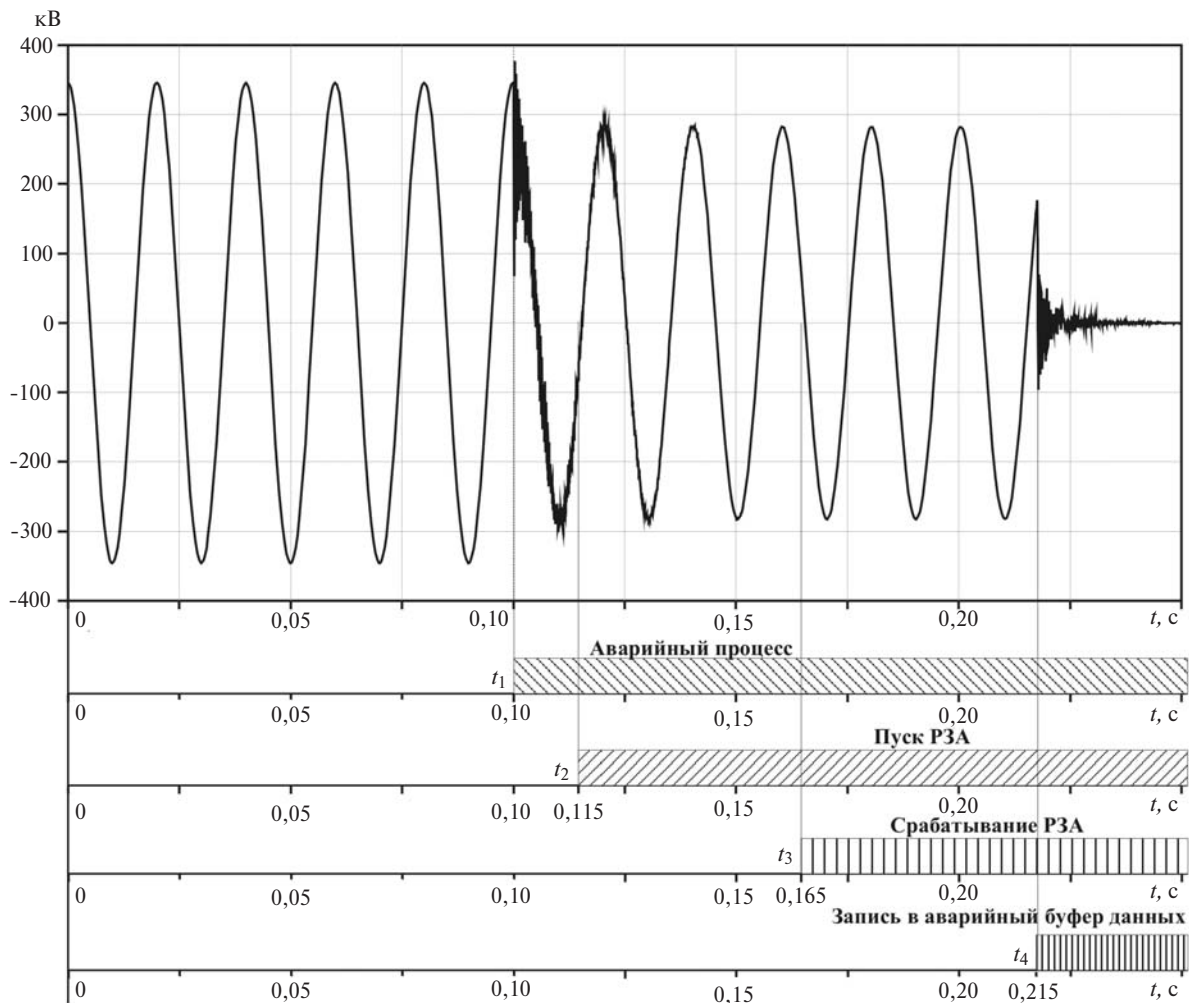


Рис. 3. Кривая аварийного напряжения поврежденной фазы при однофазном КЗ линии электропередачи и временная диаграмма действия РЗ и АПВ

Погрешности спектрального метода ОМП в ВЛ переменного тока и способы их минимизации. Погрешность, возникающая при применении спектрального метода ОМП, складывается из следующих компонент:

при низкой добротности контура (в случае высокого переходного сопротивления) частота переходного процесса смещается, что приводит к ошибке в расчете расстояния до места повреждения на ВЛ;

погрешность определения затухания;

погрешность задания «погонных» параметров линии (индуктивность, емкость, активное сопротивление);

дополнительные факторы, связанные со структурой линии (наличие отпаяк, неоднородностей, шунтирующих реакторов, других присоединений к РУ и др.).

Для устранения погрешности, связанной с неточностью определения затухания, предлагается следующая последовательность преобразований:

фильтрация сигнала для исключения частоты 50 Гц;

амплитудное детектирование;

логарифмирование.

Поскольку затухание сигнала носит экспоненциальный характер, после логарифмирования получаем линейно убывающую функцию от времени вида

$$u = A \exp(-at).$$

Угловой коэффициент a и есть ни что иное, как коэффициент затухания. Он может быть определен, например, методом наименьших квадратов [7] или методом Хаузнера–Бреннана.

«Погонные» параметры ВЛ предполагается рассчитывать исходя из геометрии проводов на опоре, а также исходя из натуральных измерений на линии электропередачи, что позволит нивелировать погрешность, возникающую при расчете «погонных» параметров линии.

В статье рассматривается только однородная линия без отпаяк и без шунтирующих реакторов.

Как было отмечено ранее, основной вклад в погрешность широко используемых импедансных методов вносит переходное сопротивление R_{Π} в месте КЗ. Далее приводится оценка влияния переходного сопротивления в месте КЗ на расчет расстояния до места повреждения спектральным методом.

На рис. 4 приведены относительные погрешности алгоритма ОМП на базе спектрального метода при КЗ на ВЛ 110, 220, 330 кВ через переходное сопротивление 30 Ом, что соответствует сопротивлению заземления опоры линии электропередачи. Значения погрешностей получены для граничных

значений сечений проводов, применимых для линий соответствующего напряжения. Кривые погрешностей построены для предельных значений длины ВЛ напряжением 110, 220 и 330 кВ: 80, 250 и 400 км соответственно [8].

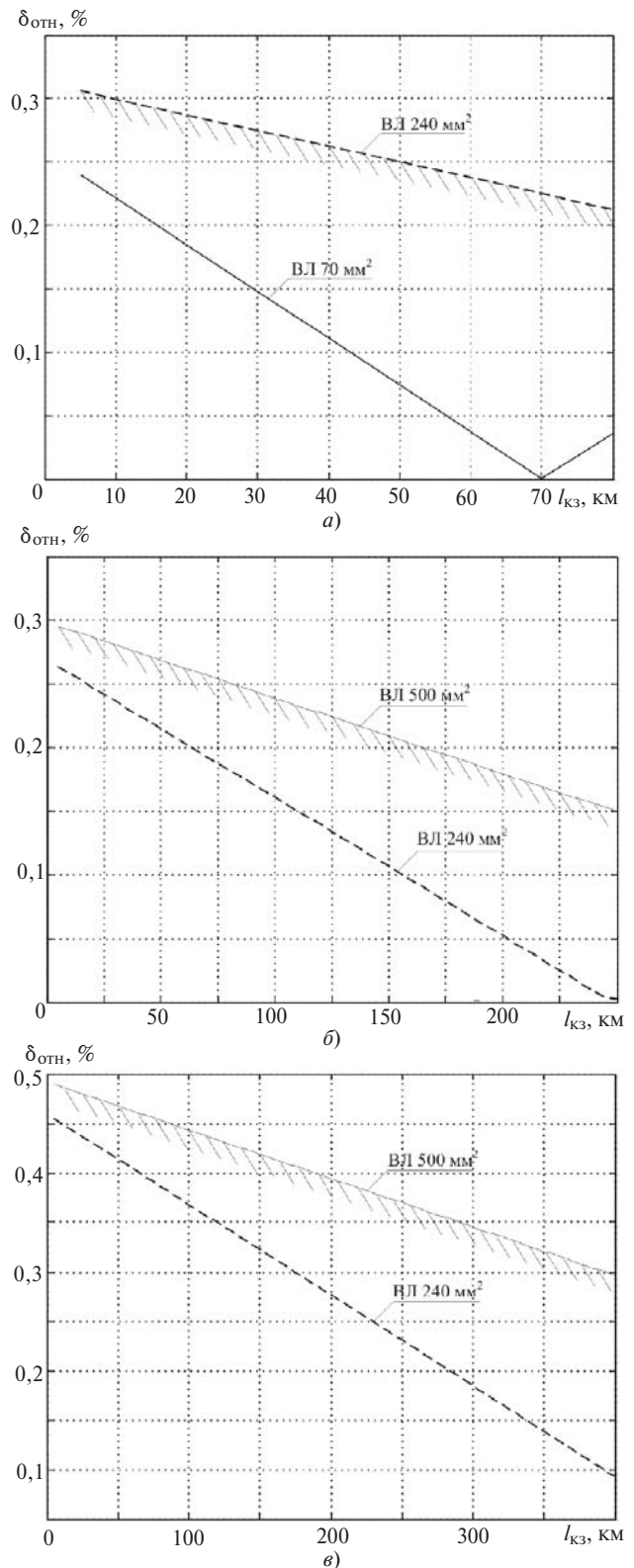


Рис. 4. Относительная погрешность предлагаемого метода ОМП при КЗ (через переходное сопротивление $R_{\Pi} = 30$ Ом): a – ВЛ 110 кВ; b – 220 кВ; v – 330 кВ

Из рис. 4,а и б видно, что погрешность спектрального метода ОМП, обусловленная наличием переходного сопротивления в месте КЗ значением порядка 30 Ом, не превышает 0,3% длины короткозамкнутого участка для ВЛ 110 и 220 кВ. Для ВЛ 330 кВ. (рис. 4,в) данная погрешность не превышает 0,5%.

Однако наряду с погрешностью расчета метода возникает дополнительная погрешность, связанная с ошибочным определением основной частоты в спектре сигнала, которая возрастает с увеличением переходного сопротивления.

Появление нескольких максимумов обусловлено связью короткозамкнутых участков линии через переходное сопротивление, из-за чего сигнал из одного контура попадает в другой контур, и наоборот. Если к тому же переходное сопротивление нелинейно, возможна генерация комбинационных частот, что еще больше усложняет картину спектра.

Данный вид погрешности вносит основной вклад в ухудшение точностных характеристик метода. Снижение погрешности, связанной с ошибочным определением основной частоты, возможно при применении спектрального метода ОМП совместно с известными импедансными алгоритмами нахождения расстояния до места замыкания в ВЛ переменного тока.

Спектральный метод как способ уточнения ОМП по ПАР в ВЛ переменного тока. Наложение дополнительных ограничений на поиск основного максимума позволит минимизировать погрешность определения места повреждения, возникающую при анализе спектра аварийного напряжения.

Для более точного нахождения расстояния до места повреждения предлагается использовать спектральный и импедансный методы ОМП совместно. При таком подходе нахождение расстояния до места замыкания будет проходить в несколько этапов.

1. Оценка с помощью известных импедансных методов ОМП, основанных на измерениях аварийных составляющих токов и напряжений основной частоты, расстояния l_x до места КЗ и определение диапазона, в котором находится истинное значение расстояния до места повреждения.

2. Определение значений частоты колебаний переходного процесса w_1 и w_2 , соответствующих расстояниям $(l_x + 0,3l_x)$ и $(l_x - 0,3l_x)$. При этом максимальная погрешность импедансного метода принята равной $\pm 30\%$. Данный параметр может варьироваться.

3. Определение максимума спектра в диапазоне (w_1, w_2) .

4. Вычисление окончательного расстояния до места КЗ по найденному максимуму.

Такой комплексный подход к определению расстояния до замыкания позволяет повысить точность результата и обеспечить независимость результата от значения переходного сопротивления и фазового угла между током и напряжением.

Проведем практическую оценку мертвой зоны при применении спектрального метода ОМП. В случае, если наивысшая различимая частота $f_{\text{верх}}$ в спектре аварийного напряжения будет не более 13–16 кГц, длина короткозамкнутого участка линии, соответствующая данному диапазону частот, равна

$$l_{\text{min}} \approx \frac{V}{f_{\text{верх}}} = \frac{300 \times 10^3}{4(13, 16)10^3} = 4,69, 5,77 \text{ км}, \quad (11)$$

где V – скорость электромагнитной волны для частоты от 13 до 16 кГц.

Для широко применяемых емкостных трансформаторов напряжения (например типа ЕМФС фирмы АВВ) допустимый частотный диапазон составляет 50, 500 кГц. При таком допустимом диапазоне наивысшая различимая частота $f_{\text{верх}}$ может быть больше 16 кГц, а соответствующая длина мертвой зоны составит менее 4,7 км.

Для применяемых в настоящее время оптико-электронных измерительных трансформаторов тока ширина полосы пропускания частот составляет до 6 кГц с возможностью расширения до 20 кГц. Данная расширенная полоса пропускания измерительных трансформаторов тока обеспечит мертвую зону при применении спектрального метода в 3,75 км. Ширина полосы пропускания для кабелей вторичной коммутации должна находиться в том же частотном диапазоне, что и для измерительных трансформаторов напряжения.

В связи с этим можно утверждать, что при применении спектрального метода ОМП мертвая зона может составлять в среднем 5 км от шин подстанции. При этом применение спектрального способа ОМП на обеих концевых подстанциях ВЛ переменного тока позволяет в этом случае практически исключить существование мертвой зоны.

При подключении устройства ОМП к измерительным цепям трансформатора напряжения необходимо следить, чтобы полная мощность подключенных приборов к трансформатору напряжения не превышала максимально допустимой мощности нагрузки ТН, указанной в паспорте. В случае если мощность нагрузки превышает номинальную мощность трансформатора для требуемого класса точности, необходимо установить еще один трансфор-

матор напряжения и часть приборов присоединить к нему.

Эффективность применения метода ОМП, использующего совместно импедансный и спектральный способы ОМП, проверена на цифровой модели ВЛ переменного тока напряжением 330 кВ, длиной 200 км. Так например, при однофазном КЗ фазы *A* на землю (переходное сопротивление $R_{\Pi} = 30$ Ом, соответствующее сопротивлению заземления опоры ЛЭП) на расстоянии 15 км до точки КЗ кривые аварийных токов и напряжений имеют вид рис. 5 и 6.

Короткое замыкание фазы *A* происходит в момент времени 0,1 с. Отключение линии на стороне ПС1 происходит в момент времени 0,157 с (рис. 5,а), отключение линии на стороне ПС2 происходит в момент времени 0,198 с (рис. 5,б).

Как правило, при КЗ на ВЛ отключение токов по концам происходит несинхронно, что приводит к неоднородности процесса КЗ. Так, отключение ВЛ с одного конца (в данном случае – ПС1) приводит к возрастанию тока КЗ в токе ВЛ другого конца (рис. 5,а).

Определим расстояние до места повреждения с использованием предлагаемого алгоритма ОМП для прибора, установленного на ПС1.

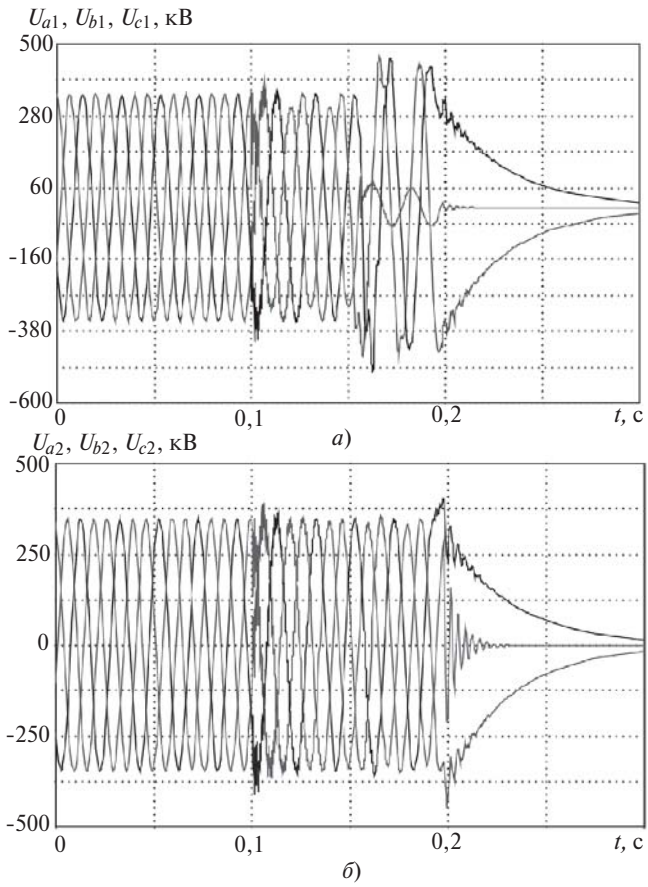


Рис. 5. Осциллограмма фазных напряжений линии при однофазном КЗ: а – со стороны ПС1; б – со стороны ПС2

Расчет расстояния до места повреждения одно-сторонним импедансным методом в соответствии с [1] дает результат:

$$l_{x\text{од}} = \frac{1}{X_0} \frac{U_A}{I_A} \sin j = \frac{1}{0,518} \frac{305,98 \times 10^3}{8,72 \times 10^3} \sin 17^\circ = 19,35 \text{ км,}$$

где X_0 – «погонное» реактивное сопротивление ВЛ; U_A – напряжение поврежденной фазы *A*, фиксируемое трансформатором напряжения, расположенным на конце ВЛ; I_A – ток в поврежденной фазе *A*, фиксируемый трансформатором тока, расположенным на конце ВЛ; j – угол между током I_A и напряжением U_A .

Погрешность в этом случае составит $d = 2,2\%$ полной длины линии.

Спектр напряжения поврежденной фазы *A* начиная с момента отключения линии со стороны ПС1 имеет вид рис. 7.

Подстановка максимальной частоты $f_1 = 288$ Гц в (1) дает результат $l_x = 182$ км. Определяем расстояние до места КЗ предлагаемым методом ОМП:

$$l_1 = l_{x\text{од}} - 0,3l_{x\text{од}} = 13,5 \text{ км; } l_2 = l_{x\text{од}} + 0,3l_{x\text{од}} = 25,2 \text{ км.}$$

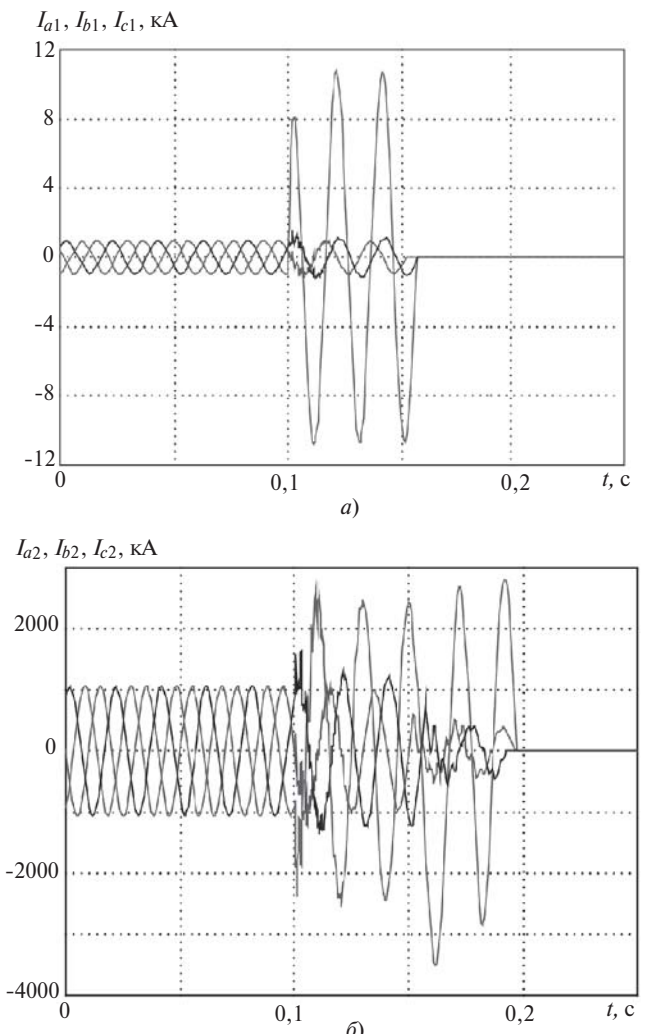


Рис. 6. Осциллограмма фазных токов линии при однофазном КЗ: а – со стороны ПС1; б – со стороны ПС2

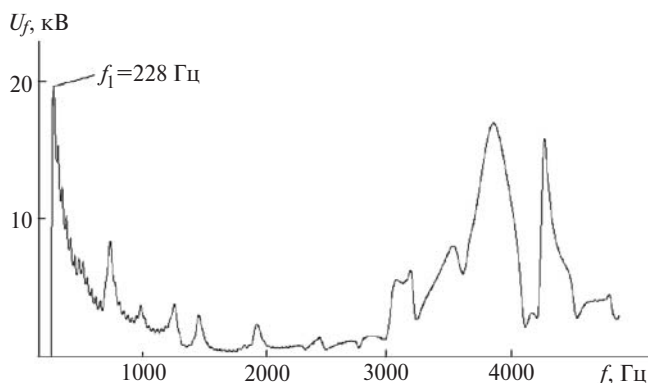


Рис. 7. Спектр напряжения поврежденной фазы со стороны ПС1

При этом диапазон частот в рассматриваемом случае 2225, 4150 Гц. Максимальная частота при этом составит 3862 Гц (см. рис. 8).

Подстановка максимальной частоты $f_m = 3862$ Гц из значимого диапазона частот в (1) дает результат $L_x = 14,6$ км, погрешность $d = 0,2\%$ полной длины линии.

В таблице приведены результаты оценки эффективности применения спектрального метода для уточнения ОМП по ПАР в модели ВЛ переменного тока при различных видах короткого замыкания.

Тип КЗ	Значение		Расчет ОМП по ПАР (в знаменателе с уточнением по спектральному методу)	
	R_{Π} , Ом	$L_{x\text{реал}}$, км	$L_{x\text{расч}}$, км	δ , %
Одно-фазное	30	15	19,35/14,6	2,2/0,2
Двух-фазное на землю	15	30	36,2/29,8	3,1/0,1
Трехфазное	0,5	140	157,4/139,5	8,7/0,25

Из таблицы видно, что определение расстояния до места повреждения на базе известных импедансных методов имеет погрешность до 9% длины линии. Уточнение расстояния до места повреждения с помощью спектрального метода позволяет снизить погрешность ОМП в рассмотренных случаях до 0,3%.

Таким образом, проверка алгоритмов предлагаемого спектрального метода для уточнения ОМП по ПАР на цифровой модели ВЛ показала, что такой подход действительно повышает точность нахождения расстояния до места замыкания. Наложение

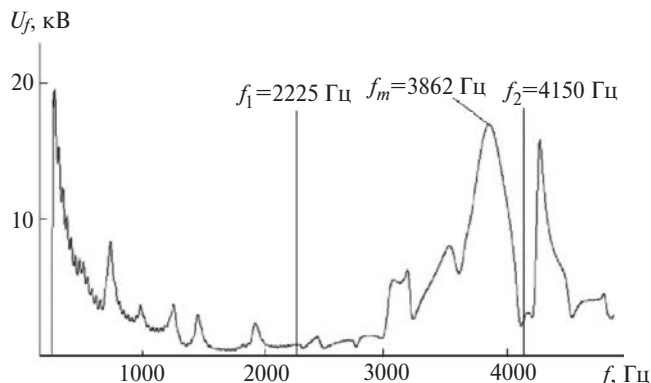


Рис. 8. Диапазон значимых частот в спектре напряжения поврежденной фазы со стороны ПС1

жение на спектральный метод ОМП дополнительного ограничения, формируемого при применении импедансного метода, позволяет максимально точно определить частоту свободных колебаний в короткозамкнутом контуре ВЛ и тем самым снизить основную погрешность спектрального метода ОМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арцишевский Я.Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с заземленной нейтралью. — М.: Высшая школа, 1988, 94 с.
2. Беляков Ю.С. Актуальные вопросы определения мест повреждения воздушных линий электропередачи. — С. Петербург: ФГОУ ДПО «ПЭИПК», 2008, 76 с.
3. Применение и техническое обслуживание микропроцессорных устройств на электростанциях и в электросетях. Ч. 1. Фиксирующие индикаторы для определения мест повреждений на воздушных линиях электропередачи/Под ред. Б.А. Алексеева. — М.: Изд. НЦ ЭНАС, 2001, 80 с.
4. СТО 56947007-29.240.55.159—2013. Типовая инструкция по организации работ для определения мест повреждений воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше. — М.: ОАО «ФСК ЕЭС».
5. Айзенфельд А.И. Методические указания по определению мест повреждения воздушных линий напряжением 110 кВ и выше с помощью фиксирующих приборов. — М.: Союзтехэнерго, 1988, 42 с.
6. Герцик К.А., Мазуров М.И., Минкин С.И., Шлайфштейн А.Х. Спектральный метод определения места повреждения на линии постоянного тока. — Сб. научных трудов «Автоматизированные системы управления технологическими процессами крупных подстанций, электропередач и вставок постоянного тока». — Л.: Энергоатомиздат, 1991, с. 27–34.
7. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. 2-е изд. — М.: Физматгиз, 1962, 349 с.
8. Справочник по проектированию электрических сетей/Под ред. Д.Л. Файбисовича. 3-е изд. — М.: ЭНАС, 2009, 392 с.
9. Бутымов А.С., Гайворонский А.С., Пуртов А.В., Соловьев А.Л. Система мониторинга грозových разрядов и определение мест повреждения ВЛ. — Воздушные линии, 2012, № 3, с. 37–42.
10. Приказ Министерства промышленности и энергетики РФ от 30 апреля 2008 г. № 216.

Автор: **Иванова Елена Алексеевна** в 2011 г. окончила электромеханический факультет С.Петербургского политехнического университета. Младший

научный сотрудник, аспирант ОАО «Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения».

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 7, pp. 12–20.

Combined method for AC transmission line fault location

Ye.A. IVANOVA

In the article disadvantages of the most popular AC transmission line fault location methods – impedance and travelling wave methods – are considered. Application of the known spectrum line fault location method for AC transmission line is investigated. Causes of possible inaccuracies of this approach are described and ways for their prevention are suggested. Influence of the fault impedance on the line fault location using spectrum approach for the AC transmission lines of different voltage types (110 kV, 220 kV and 330 kV) is estimated. New combined method based on the both impedance and spectrum approaches for line fault location in AC power lines is proposed. Error of such approach is considered to be no more than 0,5 % of the faulted AX line length.

Key words: AC transmission line, line fault location, fault impedance, impedance approach, travelling wave method, spectrum approach

REFERENCES

1. **Artsishevskii Ya.L.** *Opreleniye mest povrezhdeniya linii elektroperedachi v setyakh s zazemlennoi neutral'yu* (Fault location of transmission lines in networks with earthed neutral). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1988, 94 p.
2. **Belyakov Yu. S.** *Aktual'nye voprosy opredeleniya mest povrezhdeniya vozduzhnykh linii elektroperedachi* (Topical problems of fault location of overhead power lines). St. Petersburg, Publ. DPO «PEIPK», 2008, 76 p.
3. **Primeneniye i tekhnicheskoye obsluzhivaniye microprotsessornykh ustroystv na elektrostantsiyakh i v elektrosetyakh. Ch. 1. Fiksiruyushchiye indicatory dlya opredeleniya mest povrezhdenii na vozduzhnykh liniyakh elektroperedachi/Pod red. B. A. Alekseyeva** (Application and Maintenance of Microprocessor Devices at Power Plants and in Electric Networks. Part 1: Fixing Indicators for Locating Faults in Overhead Power Lines/ Ed. by B.A. Alekseev). Moscow, Publ. Scientific Centre ENAS, 2001, 80 p.
4. **STO 56947007-29.240.55.159–2013. Tipovaya instruktsiya po organizatsii rabot dlya opredeleniya mest povrezhdenii vozduzhnykh linii elektroperedachi napryazheniyem 110 kV i vyshye** (Enterprise Standard — 56947007-29.240.55.159-2013: A Standard Instruction for Arranging Works on Locating Faults in Overhead Power Lines with Rated Voltages of 110 kV and Higher). Moscow, JSC «Federal Grid Company of Unified Energy System», 2012.
5. **Aizenfel'd A.I.** *Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu mest povrezhdeniya vozduzhnykh linii napryazheniyem 110 kV i vyshye s*

pomoshch'yu fiksiruyushchikh priborov (Methodical Guidelines for Locating Faults in Overhead Power Lines with Rated Voltages of 110 kV or Higher by Means of Fixing Instruments). Moscow, Publ. «Soyuztekhenergo», 1988, 42 p.

6. **Gertsik K.A., Mazurov M.I., Minkin S.I., Shlaifshstein A.Kh.** *Sbornik nauchnykh trudov «Avtomatizirovannye sistemy upravleniya technologicheskimi protsessami krupnykh podstantsii, elektroperedach i vstavok postoyannogo toka»* (Collection «Automated Systems for Control of Technological Processes in Large Substations, Power Lines and Back-to-Back HVDC Links»). Leningrad, Publ. Energoatomizdat, 1991, pp. 27–34.

7. **Linnik Yu. V.** *Method naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoi teorii obrabotki nablyudenii. 2-ye izd.* (The method of least squares and the foundations of mathematics and statistical theory of observation processing. 2nd edition). Moscow, Publ. Fizmatgiz, 1962, 349 p.

8. **Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setei/Pod redaktsiyey D.L. Faibisovicha** (Guide to the design of electrical networks/Edit. By D.L. Faibisovich). 3rd Edition. Moscow, Publ. ENAS, 2009, 392 p.

9. **Butymov A.S., Gaivoronskii A.S., Purtov A.V., Solov'yev A.L.** *Vozduzhnye linii – in Russ. (Overhead lines)*, 2012, No. 3, pp. 37–42.

10. **Prikaz Ministerstva promyshlennosti i energetiki ot 30 aprelya 2008 g. No. 216** (Order of the Ministry of Industry and Energy on 30 April 2008 No. 216).

Author: **Ivanova Elena Alexeyevna** (St. Petersburg, Russia) – Junior research scientist, PhD student at the JSC «High voltage direct current power transmission research institute».

